

И. В. БАРБАШОВ, В. Р. ОБУХОВ, Д. С. РЫМОРЕВ

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ СЕТИ И СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЩНОСТЕЙ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Рассмотрена общая характеристика алгоритмов анализа режимов простых замкнутых электрических сетей. Дана характеристика алгоритма определения параметров нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей методом подбора с коррекцией по уравнивательной мощности. Проанализированы особенности уточненных расчетов простых замкнутых электрических сетей с учетом нелинейности характеристик элементов сети и статических характеристик мощности по напряжению источников питания и потребителей. Изложен подход к определению приведенных нагрузок (мощностей) подстанций с двух-, трехобмоточными трансформаторами и автотрансформаторами при уточненных расчетах электрических сетей. Рассмотрен алгоритм уточненного расчета простых замкнутых электрических сетей с учетом нелинейных характеристик элементов схем замещения электрических сетей и статических характеристик мощностей источников питания и потребителей по напряжению методом подбора с коррекцией по уравнивательной мощности (с учетом устройств РПН и ПБВ трансформаторов).

Ключевые слова: простые замкнутые электрические сети, метод подбора с коррекцией по уравнивательной мощности, приведенные нагрузки (мощности) подстанций с двух-, трехобмоточными трансформаторами и автотрансформаторами, алгоритм уточненного расчета простых замкнутых электрических сетей с учетом нелинейных характеристик элементов схем замещения электрических сетей и статических характеристик мощностей источников питания и потребителей по напряжению

I. V. BARBASHOV, V. R. OBUKHOV, D. S. RYMORIEV

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З УРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕМЕНТІВ МЕРЕЖІ І СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТУЖНОСТЕЙ СПОЖИВАЧІВ

Розглянуто загальну характеристику алгоритмів аналізу режимів простих замкнутих електричних мереж. Дана характеристика алгоритму визначення параметрів нормальних режимів простих замкнутих електричних мереж методом підбору з корекцією по зрівнювальній потужності. Проаналізовано особливості уточнених розрахунків простих замкнутих електричних мереж з урахуванням нелінійності характеристик елементів мережі і статичних характеристик потужності по напрузі джерел живлення і споживачів. Викладено підхід до визначення наведених навантажень (потужностей) підстанцій з дво-, триобмотковими трансформаторами та автотрансформаторами при уточнених розрахунках електричних мереж. Розглянуто алгоритм уточненого розрахунку простих замкнутих електричних мереж з урахуванням нелінійних характеристик елементів схем заміщення електричних мереж і статичних характеристик потужностей джерел живлення і споживачів по напрузі методом підбору з корекцією по зрівнювальній потужності (з урахуванням пристроїв РПН і ПБВ трансформаторів).

Ключові слова: прості замкнені електричні мережі, метод підбору з корекцією по зрівнювальній потужності, наведені навантаження (потужності) підстанцій з дво-, триобмотковими трансформаторами і автотрансформаторами, алгоритм уточненого розрахунку простих замкнених електричних мереж з урахуванням нелінійних характеристик елементів схем заміщення електричних мереж і статичних характеристик потужностей джерел живлення і споживачів по напрузі.

I. V. BARBASHOV, V. R. OBUKHOV, D. S. RYMORIEV

THE CALCULATION OF THE ELECTRIC NETWORKS TAKING INTO ACCOUNT THE NONLINEARITY CHARACTERISTICS OF NETWORK ELEMENTS AND THE STATIC CHARACTERISTICS OF CAPACITY CONSUMERS

The General characteristic of the algorithms for the analysis of simple closed electric networks modes is considered. The characteristic of the algorithm for determining the parameters of normal modes of simple closed electric networks by the method of choice with correction for power equalization were given. The features of the refined calculations of simple closed electric networks were analyzed taking into account the nonlinearity of the characteristics of network elements and static characteristics power by the voltage of the power sources and consumers. The approach to the definition of reduced loads (capacity) of substations with two-, three-winding transformers and autotransformers in the refined calculations of electrical networks. The algorithm improved calculation of a simple closed electrical networks with non-linear characteristics of elements of the equivalent circuits of electrical networks and static characteristics of the capacity of food sources and consumers for voltage selection method with correction for surge capacity (including tap changers and transformers WSP).

Key words: simple closed electrical network, the method of selection with correction for surge capacity, given the load (power) substations with two-, three-winding transformers and autotransformers, the algorithm improved calculation of a simple closed electrical networks with non-linear characteristics of elements of the equivalent circuits of electrical networks and static characteristics of the capacity of food sources and consumers for voltage.

Введение. Простыми замкнутыми электрическими сетями называются сети, в которых электроэнергия к узлам нагрузки подается не менее чем с двух сторон и которые содержат только один замкнутый контур.

К простым замкнутым электрическим сетям относятся кольцевые сети (рис. 1, а) и сети с двухсторонним питанием (рис. 1, б).

Отличительной особенностью кольцевых электрических сетей является наличие в сети одного источника питания (ИП) и, следовательно, одного значения напряжения $U_{ИП}$. Сети с двухсторонним

© И. В. Барбашов, В. Р. Обухов, Д. С. Рыморев, 2019

питанием имеют два ИП и, следовательно, два значения напряжения $U_{ИП1}$ и $U_{ИП2}$, которые, как правило, не равны ($U_{ИП1} \neq U_{ИП2}$).

Простые замкнутые электрические сети также могут иметь одинаковые либо различные номинальные напряжения участков.

1. Общая характеристика алгоритмов анализа режимов простых замкнутых электрических сетей

Традиционные алгоритмы анализа режимов простых замкнутых электрических сетей [1–5] основываются непосредственно на методах контурных токов и мощностей, а также их разновидности – методе расщепления сети. Для анализа режимов простых замкнутых электрических сетей широко используется принцип (метод) наложения.

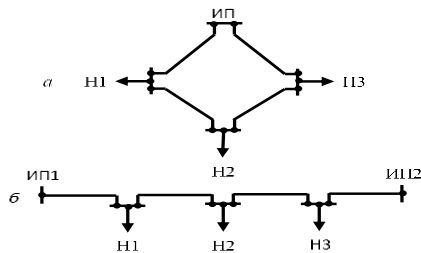


Рис. 1 – Схемы простых замкнутых электрических сетей

При расчете нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей возможны такие варианты организации вычислений:

1) рассматривать сеть как замкнутую и расчет выполнять на основе второго закона Кирхгофа (контурных уравнений);

2) вести расчет сети как разомкнутой, разрезая сеть по узлу с ИП; в этом случае результатом расчета должно быть такое потокораспределение в сети, при котором напряжения в начале и в конце равны по модулю и по фазе.

При первом варианте организации вычислений определение параметров нормальных режимов простой замкнутой электрической сети выполняется методом итераций в три этапа:

этап 1 – определение потоков мощности на участках электрической сети при заданных нагрузках и сопротивлениях (или длинах) участков (при допущении отсутствия потерь мощности на участках сети и равенстве номинальному напряжений в узлах). На этом этапе в случае электрических сетей с двухсторонним питанием дополнительно применяется принцип (метод) наложения;

этап 2 – определение потоков мощности с учетом ее потерь на участках электрической сети (при допущении равенства номинальному напряжений в узлах);

этап 3 – определение значений напряжения в узлах электрической сети (при заданных напряжениях ИП).

При втором варианте организации вычислений определение параметров нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей осуществляется методом подбора с коррекцией по уравнивающей мощности.

2. Характеристика алгоритма определения параметров нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей методом подбора с коррекцией по уравнивающей мощности

Порядок расчета параметров нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей методом подбора с коррекцией по уравнивающей мощности подробно рассмотрен в [4–6].

Система обозначений при определении параметров нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей показана на рис. 2.

Исходными данными при расчете параметров нормальных режимов сети с двухсторонним питанием являются расчетные нагрузки узлов $\underline{S}_1, \dots, \underline{S}_4$, длины участков сети L_{A-1}, \dots, L_{4-B} , сопротивления участков сети $\underline{Z}_{A-1}, \dots, \underline{Z}_{4-B}$, а также напряжения источников питания U_A и U_B .

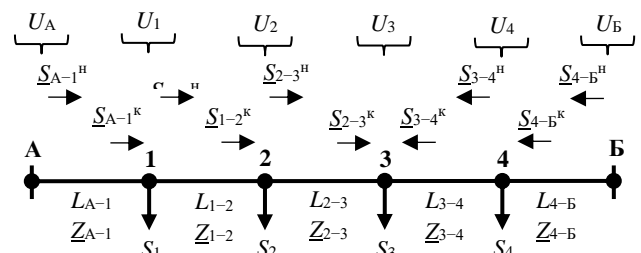


Рис. 2 – Система обозначений при определении параметров нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей

Расчет простых замкнутых электрических сетей методом подбора с коррекцией по уравнивающей мощности включает ряд шагов расчета, в каждом из которых определяются мощности на участках электрической сети с учетом ее потерь, а также значения напряжений в узлах электрической сети.

Результаты первого шага расчета являются основой дальнейшего определения параметров нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей.

Первый шаг расчета

Задано напряжение источника питания U_A .

В качестве исходного значения \underline{S}_{A-1}^H (при допущении однородности сети) может быть принято значение, рассчитанное по выражению

$$\underline{S}_{A-1} = [\underline{S}_1 (L_{1-2} + L_{2-3} + L_{3-4} + L_{4-B}) + \underline{S}_2 (L_{2-3} + L_{3-4} + L_{4-B}) + \underline{S}_3 (L_{3-4} + L_{4-B}) + \underline{S}_4 L_{4-B}] / (L_{A-1} + L_{1-2} + L_{2-3} + L_{3-4} + L_{4-B}).$$

1) участок A–1:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{A-1}^H &= \underline{S}_{A-1}; \\ \underline{S}_{A-1}^K &= \underline{S}_{A-1}^H - \Delta \underline{S}_{A-1}^H = \\ &= \underline{S}_{A-1}^H - \{[(\underline{S}_{A-1}^H)^2 + (\underline{S}_{A-1}^H)^2] / U_A^2\} (R_{1-2} + jX_{1-2}); \\ U_1 &= U_A - \Delta U_{A-1}^H = U_A - (P_{A-1}^H R_{A-1} + Q_{A-1}^H X_{A-1}) / U_A; \end{aligned}$$

2) участок 1–2:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{1-2}^H &= \underline{S}_{A-1}^K - \underline{S}_1; \\ \underline{S}_{1-2}^K &= \underline{S}_{1-2}^H - \Delta \underline{S}_{1-2}^H = \\ &= \underline{S}_{1-2}^H - \{[(\underline{S}_{1-2}^H)^2 + (\underline{S}_{1-2}^H)^2] / U_1^2\} (R_{1-2} + jX_{1-2}); \\ U_2 &= U_1 - \Delta U_{1-2}^H = U_1 - (P_{1-2}^H R_{12} + Q_{1-2}^H X_{1-2}) / U_1; \end{aligned}$$

3) участок 2–3:

$$\begin{aligned}\underline{S}_{2-3}^K &= \underline{S}_2 - \underline{S}_{1-2}^K; \\ \underline{S}_{2-3}^H &= \underline{S}_{2-3}^K + \Delta \underline{S}_{2-3}^K = \\ &= \underline{S}_{2-3}^K + \{[(\underline{S}_{2-3}^K)^2 + (\underline{S}_{2-3}^H)^2] / U_2^2\} (R_{2-3} + jX_{2-3}); \\ U_3 &= U_2 + \Delta U_{2-3}^K = U_2 + (P_{2-3}^K R_{2-3} + Q_{2-3}^K X_{2-3}) / U_2;\end{aligned}$$

4) участок 3–4:

$$\begin{aligned}\underline{S}_{3-4}^K &= \underline{S}_{2-3}^H + \underline{S}_3; \\ \underline{S}_{3-4}^H &= \underline{S}_{3-4}^K + \Delta \underline{S}_{3-4}^K = \\ &= \underline{S}_{3-4}^K + \{[(\underline{S}_{3-4}^K)^2 + (\underline{S}_{3-4}^H)^2] / U_3^2\} (R_{3-4} + jX_{3-4}); \\ U_4 &= U_3 + \Delta U_{3-4}^K = U_3 + (P_{3-4}^K R_{3-4} + Q_{3-4}^K X_{3-4}) / U_3;\end{aligned}$$

5) участок 4–Б:

$$\begin{aligned}\underline{S}_{4-Б}^K &= \underline{S}_{3-4}^H + \underline{S}_4; \\ \underline{S}_{4-Б}^H &= \underline{S}_{4-Б}^K + \Delta \underline{S}_{4-Б}^K = \\ &= \underline{S}_{4-Б}^K + \{[(\underline{S}_{4-Б}^K)^2 + (\underline{S}_{4-Б}^H)^2] / U_4^2\} (R_{4-Б} + jX_{4-Б}); \\ U_Б &= U_4 + \Delta U_{4-Б}^K = U_4 + (P_{4-Б}^K R_{4-Б} + Q_{4-Б}^K X_{4-Б}) / U_4.\end{aligned}$$

Второй шаг расчета

Обычно рассчитанное напряжение $U_Б$ не равно заданному, что свидетельствует о несоответствии полученного расчетного режима действительному. Тогда определяется некоторая «коррекционная» мощность (которую в литературе принято называть «уравнительной», хотя такое название не полностью соответствует сути метода подбора с коррекцией по уравнительной мощности), протекание которой по сети приводит к сближению значений напряжений по концам замкнутой электрической сети с заданными.

В общем случае для изменения напряжения источника $U_Б$ до заданного значения $U_{Б\text{ зад}}$ по сети должна протекать мощность $\underline{S}_{\text{кор}} = [(U_Б - U_{Б\text{ зад}}) U_{Б\text{ зад}}] / \underline{Z}_{А-Б}^*$. Направление «коррекционной» мощности должно способствовать увеличению мощностей, протекающих по участкам сети, при необходимости снижения значения $U_Б$ и уменьшению мощностей, протекающих по участкам сети, при необходимости увеличения значения $U_Б$.

В случае протекания по сети «коррекционной» мощности, направленной от источника «Б» к источнику «А» результирующая мощность в начале участка А–1 будет равна

$$\underline{S}_{А-1\text{ р}}^H = \underline{S}_{А-1}^H - \underline{S}_{\text{кор}}.$$

Дальнейший расчет будет включать позиции, аналогичные первому шагу:

$$\begin{aligned}\underline{S}_{А-1}^K &= \underline{S}_{А-1}^H - \Delta \underline{S}_{А-1}^H = \\ &= \underline{S}_{А-1}^H - \{[(\underline{S}_{А-1}^H)^2 + (\underline{S}_{А-1}^K)^2] / U_A^2\} (R_{А-1} + jX_{А-1}); \\ U_1 &= U_A - \Delta U_{А-1}^H = U_A - (P_{А-1}^H R_{А-1} + Q_{А-1}^H X_{А-1}) / U_A; \\ \underline{S}_{1-2}^H &= \underline{S}_{А-1}^K - \underline{S}_1; \\ \underline{S}_{1-2}^K &= \underline{S}_{1-2}^H - \Delta \underline{S}_{1-2}^H = \\ &= \underline{S}_{1-2}^H - \{[(\underline{S}_{1-2}^H)^2 + (\underline{S}_{1-2}^K)^2] / U_1^2\} (R_{1-2} + jX_{1-2}); \\ U_2 &= U_1 - \Delta U_{1-2}^H = U_1 - (P_{1-2}^H R_{1-2} + Q_{1-2}^H X_{1-2}) / U_1; \\ \underline{S}_{2-3}^K &= \underline{S}_2 - \underline{S}_{1-2}^K; \\ \underline{S}_{2-3}^H &= \underline{S}_{2-3}^K + \Delta \underline{S}_{2-3}^K = \\ &= \underline{S}_{2-3}^K + \{[(\underline{S}_{2-3}^K)^2 + (\underline{S}_{2-3}^H)^2] / U_2^2\} (R_{2-3} + jX_{2-3}); \\ U_3 &= U_2 + \Delta U_{2-3}^K = U_2 + (P_{2-3}^K R_{2-3} + Q_{2-3}^K X_{2-3}) / U_2; \\ \underline{S}_{3-4}^H &= \underline{S}_{2-3}^H + \underline{S}_3; \\ \underline{S}_{3-4}^K &= \underline{S}_{3-4}^H + \Delta \underline{S}_{3-4}^K = \\ &= \underline{S}_{3-4}^H + \{[(\underline{S}_{3-4}^H)^2 + (\underline{S}_{3-4}^K)^2] / U_3^2\} (R_{3-4} + jX_{3-4}); \\ U_4 &= U_3 + \Delta U_{3-4}^K = U_3 + (P_{3-4}^K R_{3-4} + Q_{3-4}^K X_{3-4}) / U_3;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{S}_{4-Б}^H &= \underline{S}_{4-Б}^K + \Delta \underline{S}_{4-Б}^K = \\ &= \underline{S}_{4-Б}^K + \{[(\underline{S}_{4-Б}^K)^2 + (\underline{S}_{4-Б}^H)^2] / U_4^2\} (R_{4-Б} + jX_{4-Б}); \\ U_Б &= U_4 + \Delta U_{4-Б}^K = U_4 + (P_{4-Б}^K R_{4-Б} + Q_{4-Б}^K X_{4-Б}) / U_4.\end{aligned}$$

Если и в этом случае найденное напряжение $U_Б$ не равно заданному, расчеты повторяются пока не будет достигнута желаемая точность расчета.

3. Особенности уточненных расчетов простых замкнутых электрических сетей с учетом нелинейности характеристик элементов сети и статических характеристик мощности по напряжению источников питания и потребителей

В общем случае уточненный расчет электрических сетей требует учета нелинейности характеристик элементов сети и статических характеристик мощности по напряжению источников питания и потребителей.

Нелинейные элементы электрических систем и сетей (статические характеристики источников питания, нагрузок потребителей, ветвей намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов, шунтирующих реакторов, поперечных элементов схем замещения линий) и их характеристики рассмотрены в [4, 5, 7].

Подробная характеристика методов определения параметров нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей для различных случаев задания нагрузок узлов и характеристик участков замкнутых электрических сетей дана в [1–5]. Так для определения параметров нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей использовались «классические» методы контурных уравнений, наложения, размыкания по точкам потокоораздела и т. п. Так, потокооразделение в кольцевой электрической сети и сети с двухсторонним питанием находится при принятых допущениях об отсутствии потерь и равенстве напряжений во всех узлах. Это потокооразделение является приближенным; оно может рассматриваться лишь как первое приближение и должно быть уточнено. Кроме того, в случае сети с двухсторонним питанием полученное на начальном этапе потокооразделение уточняется наложением на потоки мощности, рассчитанные в кольцевой электрической сети (при $U_A = U_Б$), уравнительной мощности, направленной от источника питания с большим напряжением в сторону источника питания с меньшим напряжением. На втором этапе расчета простых замкнутых электрических сетей уточняются потоки на участках сети путем учета потерь мощности. При этом кольцевая сеть рассматривается как совокупность двух разомкнутых сетей, связанных в точке потокоораздела. Третий завершающий этап расчета заключается в определении напряжений в нагрузочных точках сети. Исходными данными для него служат напряжения на шинах ИП (\underline{U}_A и $\underline{U}_Б$) и найденные на предыдущем этапе расчета уточненные значения мощности на участках сети. Анализ «классического» подхода к определению параметров нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей позволяет признать, что учет нелинейности характеристик элементов сети и

статических характеристик мощностей по напряжению источников питания и потребителей при расчете простых замкнутых электрических сетей на основе контурных уравнений в три этапа практически не выполним.

Такой же вывод следует сделать относительно применения метода систематизированного подбора для расчета простых замкнутых электрических сетей. Согласно проведенному в подразделе 1.5 [6] анализу, этот метод громоздок и дает весьма приближенный результат.

Предпочтительным для расчета простых замкнутых электрических сетей с учетом нелинейных характеристик элементов схем замещения электрических сетей и статических характеристик мощностей по напряжению источников питания и потребителей является использование метода подбора с коррекцией по уравнительной мощности.

4. Определение приведенных нагрузок (мощностей) ПС с двух-, трехобмоточными трансформаторами и автотрансформаторами при уточненных расчетах электрических сетей

При анализе режимов электрических сетей энергосистем используется понятие *приведенная нагрузка* (мощность), которое вводится (в тех случаях, когда можно вводить упрощающие допущения) с целью упрощения расчетных схем сетей, их математических моделей и сокращения объемов расчетов.

Приведение нагрузки (мощности) заключается в том, что нагрузка, приложенная к шинам НН (СН) ПС, переносится на шины ВН ПС с учетом потерь мощности в сопротивлениях и проводимостях схемы замещения силовых трансформаторов. Приведенная нагрузка, представляющая собой алгебраическую сумму нагрузок, приложенных к шинам НН (СН) ПС, и потерь мощности в продольных сопротивлениях Z_T (Z_n , Z_c) и поперечных проводимостях Y_T силовых трансформаторов считается включенной на шинах ВН ПС, а сами трансформаторы исключаются из расчетной схемы.

Для узлов электрической сети с двухобмоточными трансформаторами (рис. 3) приведенная нагрузка определяется по выражению:

$$S_n = S_n + \Delta S_{T(Z)} + \Delta S_{T(Y)},$$

где S_n – нагрузка на стороне низшего напряжения трансформаторов; $\Delta S_{T(Z)}$ – потери мощности в продольных сопротивлениях схемы замещения трансформаторов; $\Delta S_{T(Y)}$ – потери мощности в поперечных проводимостях схемы замещения трансформаторов.

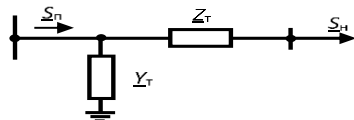


Рис. 3 – Схема замещения узла электрической сети с двухобмоточными трансформаторами

Для узлов электрической сети с трехобмоточными трансформаторами и

автотрансформаторами (рис. 4) приведенная нагрузка определяется по выражению:

$$S_n = S_n + S_c + \Delta S_{n(Z)} + \Delta S_{c(Z)} + \Delta S_{b(Z)} + \Delta S_{T(Y)},$$

где S_n и S_c – нагрузки на стороне низшего и среднего напряжений трансформаторов; $\Delta S_{n(Z)}$, $\Delta S_{c(Z)}$, $\Delta S_{b(Z)}$ – потери мощности в продольных сопротивлениях схемы замещения трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов (обмотках низшего, среднего и высшего напряжения); $\Delta S_{T(Y)}$ – потери мощности в поперечных проводимостях схемы замещения трансформаторов.

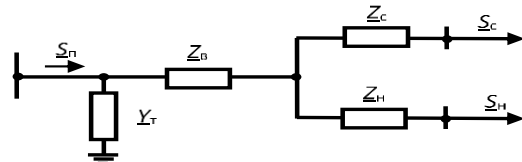


Рис. 4 – Схема замещения узла электрической сети с трехобмоточными трансформаторами и автотрансформаторами

Определенную сложность при нахождении приведенных нагрузок узлов с двух-, трехобмоточными трансформаторами и автотрансформаторами создаёт необходимость учета всего диапазона изменений коэффициентов трансформации трансформаторов, снабженных устройствами РПН (а также устройствами ПБВ в случае трехобмоточных трансформаторов).

Удовлетворительное решение поставленной задачи определения приведенных нагрузок узлов с учетом реальных нелинейных характеристик их элементов может быть предложено в виде следующей расчетной операции – *определения приведенных нагрузок узлов для условий всех рассматриваемых нормальных режимов с учетом требований встречного регулирования напряжений на вторичной стороне ПС и всего диапазона изменений коэффициентов трансформации трансформаторов, снабженных устройствами РПН (а также устройствами ПБВ в случае трехобмоточных трансформаторов).*

В разделе 4 «Приведенные и расчетные нагрузки узлов электрической сети» [8] рассмотрены примеры определения приведенных нагрузок узлов для условий всех рассматриваемых нормальных режимов с учетом требований встречного регулирования напряжений на низшей стороне ПС (а также стабилизации напряжений на средней стороне ПС) и всего диапазона изменений коэффициентов трансформации двух-, трехобмоточными трансформаторами и автотрансформаторами при уточненных расчетах электрических сетей, снабженных устройствами РПН и ПБВ.

В качестве примера рассмотрим расчет приведенных нагрузок (мощностей) ПС с двухобмоточными трансформаторами типа 2×ТДН–16000/110 и нагрузкой на стороне низшего напряжения $S_{ni} = 19$ МВА ($S_{ni} = 17,67 + j6,9836$ МВА) с использованием следующих обозначений величин:

1) согласно условиям встречного регулирования [1–3], желаемые напряжения на стороне низшего напряжения трансформаторов узлов электрической сети в режиме наибольшей нагрузки $U_{н.жел} = 1,05 U_{ном.н} = 1,05 \cdot 10 = 10,5$ кВ;

2) относительное значение желаемого напряжения на низшей стороне трансформаторов узла электрической сети в режиме наибольшей нагрузки $U_{н.жел}^* = U_{н.жел} / U_{ном.н} = 10,5 / 10 = 1,05$ отн. ед.;

3) коэффициенты трансформации трансформаторов, рассчитываемые по формуле $k_{тi} = (U_{н.в} + n_{от.в} \delta_v) / U_{н.н}$, где для трансформаторов 110 кВ с устройством РПН $n_{от.в} = \pm 9$ ответвлений и 0 вывод, $\delta_v \% = 1,78 \%$ от $U_{н.в}$, номинальные напряжения обмоток трансформаторов $U_{н.в} = 115$ кВ, $U_{н.н} = 11$ кВ;

4) действительные значения напряжения на низшей стороне трансформаторов, приведенные к высшей, рассчитываются по формуле $U_{н.в}^B = U_{н.ж} k_{тi}$ для желаемого напряжения на стороне низшего напряжения трансформаторов и соответствующих значений коэффициентов трансформации трансформаторов для всего интервала значений $n_{от.в}$;

5) фактические значения мощности нагрузки на низшей стороне трансформаторов узла электрической сети соответственно равны:

$$P_{ни}(U) = (a_P + b_P U_{н.ж}^* + c_P U_{н.ж}^{*2}) P_{нi};$$

$$Q_{ни}(U) = (a_Q + b_Q U_{н.ж}^* + c_Q U_{н.ж}^{*2}) Q_{нi},$$

где $a_P = 0,83$; $b_P = -0,3$; $c_P = 0,47$; $a_Q = 4,9$; $b_Q = -10,1$; $c_Q = 6,2$, тогда в режиме наибольшей нагрузки

$$P_{ни}(U) = (0,83 - 0,3 \cdot 1,05 + 0,47 \cdot 1,05^2) P_{нi}^{нб} = 1,0332 P_{нi}^{нб};$$

$$Q_{ни}(U) = (4,9 - 10,1 \cdot 1,05 + 6,2 \cdot 1,05^2) Q_{нi}^{нб} = 1,1305 Q_{нi}^{нб};$$

6) действительные значения напряжения на высшей стороне трансформаторов

$$U_{ви} = \sqrt{\{U_{нi}^B + (P_{ни} R_{тi} + Q_{ни} X_{тi}) / U_{нi}^B\}^2 + \{P_{ни} X_{тi} - Q_{ни} R_{тi} / U_{нi}^B\}^2};$$

7) значения потерь мощности в продольной ветви схемы замещения трансформаторов

$$\Delta S_{тi} = (P_{ни}^2 + Q_{ни}^2) / (U_{нi}^B)^2 (R_{тi} + jX_{тi});$$

8) значения мощности на высшей стороне трансформаторов с учетом потерь в продольной ветви схемы замещения трансформаторов

$$S_{ви}' = S_{ни} + \Delta S_{тi};$$

9) значения потерь мощности в поперечной ветви схемы замещения трансформаторов

$$\Delta S_{xi} = G_{тi} U_{ви}^2 + jB_{тi} U_{ви}^2;$$

10) значения мощности на высшей стороне трансформаторов (т. н. приведенная мощность)

$$S_{пи} = S_{ви} = S_{ви}' + \Delta S_{xi}.$$

Рассчитанные значения напряжения $U_{ви}$ и мощности на высшей стороне $S_{пи}$ трансформаторов ТДН–16000/110 представлены в табл. 1.

5. Уточненный расчет простых замкнутых электрических сетей с учетом нелинейных характеристик элементов схем замещения электрических сетей и статических характеристик мощностей источников питания и потребителей по напряжению методом подбора с коррекцией по уравнивающей мощности (с учетом устройств РПН и ПБВ трансформаторов)

В подразделе 1.6 [6] подробно изложен алгоритм уточненного расчета простых замкнутых электрических сетей с учетом нелинейных характеристик элементов схем замещения электрических сетей и статических характеристик мощностей источников питания и потребителей по напряжению методом подбора с коррекцией по уравнивающей мощности (с учетом устройств РПН и ПБВ трансформаторов). В [6] также рассмотрен пример такого расчета, выполняемый на ПК.

Рассмотрим основные положения указанного алгоритма и некоторые результаты расчета, дающие представление о сути предлагаемого метода уточненного расчета простой замкнутой электрической сети. Фрагмент схемы такой сети показан на рис. 5.

Таблица 1 – Расчет приведенных нагрузок (мощностей) ПС с двухобмоточными трансформаторами в режиме наибольшей нагрузки ($U_{н.жел} = 10,5$ кВ)

i	$U_{ви}$, кВ	$P_{ви}$, МВт	$Q_{ви}$, Мвар
+9	133,9137	18,389242	10,161621
+8	132,07863	18,391896	10,223901
+7	130,24808	18,394722	10,289427
+6	128,42232	18,39773	10,358405
+5	126,60162	18,400932	10,431058
+4	124,78629	18,40434	10,116794
+3	122,97666	18,407967	10,588378
+2	121,17309	18,411828	10,673592
+1	119,37597	18,415938	10,763581
0	117,58572	18,420314	10,858685
–1	115,80279	18,424976	10,959271
–2	114,02769	18,299683	10,583553
–3	112,26095	18,435239	11,178546
–4	110,50317	18,440887	11,298161
–5	108,75499	18,446914	11,425122
–6	107,01712	18,45335	11,560015
–7	105,29034	18,460229	11,703487
–8	103,57551	18,467585	11,856252
–9	101,87356	18,475459	12,019100

Примечание. В табл. 1 $n_{от.в}$ обозначено буквой i .

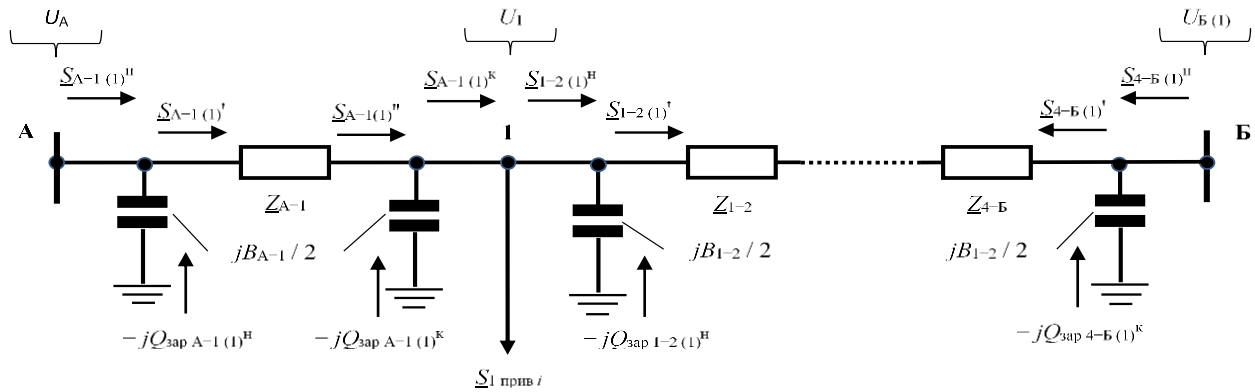


Рис. 5 – Фрагмент схемы простой замкнутой электрической сети

Первый шаг расчета:

1) мощность в начале головного участка сети А-1 (при допущении однородности сети) условно принимается равной мощности

$$\underline{S}_{A-1(1)}^H = [\underline{S}_{1 \text{ прив } (0)} (L_{1-2} + L_{2-3} + L_{3-4} + L_{4-Б}) + \underline{S}_{2 \text{ прив } (0)} (L_{2-3} + L_{3-4} + L_{4-Б}) + \underline{S}_{3 \text{ прив } (0)} (L_{3-4} + L_{4-Б}) + \underline{S}_{4 \text{ прив } (0)} L_{4-Б}] / (L_{A-1} + L_{1-2} + L_{2-3} + L_{3-4} + L_{4-Б}),$$

где $\underline{S}_{1 \text{ прив } (0)}, \dots, \underline{S}_{4 \text{ прив } (0)}$ – приведенные нагрузки узлов для условий рассматриваемого установившегося режима и «нулевых» ответвлений устройств РПН и ПБВ трансформаторов;

Примечание. Мощность в начале головного участка сети А-1 (при неоднородности сети) условно можно определить по выражению $\underline{S}_{A-1(1)}^H = (\underline{S}_{1 \text{ прив } (0)} + \underline{S}_{2 \text{ прив } (0)} + \underline{S}_{3 \text{ прив } (0)} + \underline{S}_{4 \text{ прив } (0)}) / 2$;

2) при заданном напряжении ИП \underline{U}_A находятся:

– зарядная (емкостная) мощность трех фаз в начале участка сети А-1

$$-jQ_{зар A-1(1)}^H = -U_A^2 jB_{A-1} / 2;$$

– мощность в начале продольной части участка сети А-1

$$\underline{S}_{A-1(1)}' = \underline{S}_{A-1(1)}^H + jQ_{зар A-1(1)}^H;$$

– потеря мощности на участке А-1

$$\Delta \underline{S}_{A-1(1)}' = \{[(P_{A-1(1)}')^2 + (Q_{A-1(1)}')^2] / U_A^2\} (R_{A-1} + jX_{A-1});$$

где $\underline{S}_{1 \text{ прив } i}$ – приведенная к стороне ВН трансформаторов мощность узла 1; эта мощность принимается из зависимости $\underline{S}_{1 \text{ прив } i} = f(\underline{U}_{1 \text{ в } i})$ при наибольшем совпадении (близости) напряжений $\underline{U}_{1(1)}$ и $\underline{U}_{1 \text{ в } i}$.

Далее процедура расчета повторяется так же, как и для участка А-1, находятся: – мощность в конце продольной части меньше, чем мощность в начале продольной части, на значение потерь мощности, т. е.

$$\underline{S}_{A-1(1)}'' = \underline{S}_{1-2(1)}' - \Delta \underline{S}_{A-1(1)}';$$

– напряжение в нагрузочном узле 1

$$\underline{U}_{1(1)} = \underline{U}_A - (P_{A-1(1)}' R_{A-1} + Q_{A-1(1)}' X_{A-1}) / U_A - j(P_{A-1(1)}' X_{A-1} - Q_{A-1(1)}' R_{A-1}) / U_A;$$

– зарядная (емкостная) мощность трех фаз в конце участка сети А-1

$$-jQ_{зар A-1(1)}^K = -U_{1(1)}^2 jB_{A-1} / 2;$$

– мощность в конце участка А-1

$$\underline{S}_{A-1(1)}^K = \underline{S}_{A-1(1)}'' + jQ_{зар A-1(1)}^K;$$

– по балансу мощностей в узле 1 рассчитывается мощность в начале участка 1-2

$$\underline{S}_{1-2(1)}^H = \underline{S}_{A-1(1)}^K - \underline{S}_{1 \text{ прив } i},$$

– зарядная (емкостная) мощность в начале участка сети 1-2;

– мощность в начале продольной части участка сети 1-2;

– потеря мощности на участке 1-2;

– мощность в конце продольной части участка 1-2;

– напряжение в нагрузочной точке 2;

– зарядная (емкостная) мощность в конце участка сети 1-2;

– мощность в конце участка 1-2;

– по балансу мощностей в узле 2

рассчитывается мощность в начале участка 2-3.

Такой расчет ведется вплоть до получения напряжения (первое приближение) $\underline{U}_{Б(1)}$. Обычно это напряжение не равно заданному напряжению $\underline{U}_Б$, что свидетельствует о несоответствии полученного расчетного режима действительному.

Второй шаг расчета

Для уточнения определяется «коррекционная» мощность, протекание по сети которой приведет к приближению напряжения $\underline{U}_{Б(1)}$ к заданному значению $\underline{U}_{Б \text{ зад}}$.

Значение «коррекционной» мощности вычисляется по выражению:

$$\underline{S}_{кор(2)} = [(U_{Б(1)} - U_{Б \text{ зад}}) U_{Б \text{ зад}}] / \underline{Z}_{А-Б}^*,$$

где $\underline{Z}_{А-Б}^*$ – сопряженный комплекс сопротивления; $\underline{Z}_{А-Б}^* = (R_{А-Б} - jX_{А-Б})$.

Направление мощности $\underline{S}_{кор(2)}$ должно быть принято от исходной точки Б (при $U_{Б(1)} > U_{Б}$) либо к исходной точке Б (при $U_{Б(1)} < U_{Б}$).

Тогда при $U_{Б(1)} > U_{Б}$ на участке А-1 результирующая мощность будет равна

$$\underline{S}_{A-1(2)}^H = \underline{S}_{A-1(1)}^H + \underline{S}_{\text{кор}(2)}.$$

Дальнейший расчет проводится по соотношениям первого шага вплоть до нахождения величины $U_{B(2)}$.

Выводы. В результате находится новое, уточненное значение напряжения $\underline{U}_B(2)$. Если оно недостаточно точно соответствует заданному значению \underline{U}_B зад, определяется новое значение «коррекционной» мощности $\underline{S}_{\text{кор}(3)}$ и т. д., пока не будет достигнута желаемая точность расчета.

Такой алгоритм основан на повторении однотипных вычислений, легко реализуем на ПК и может быть использован для уточненных расчетов простых замкнутых электрических сетей с учетом нелинейных характеристик элементов схем замещения электрических сетей и статических характеристик мощностей источников питания и потребителей по напряжению методом подбора с коррекцией по уравнивательной мощности (с учетом устройств РПН и ПБВ трансформаторов).

Список литературы

1. Электрические системы. Электрические сети / В. А. Веников, А. А. Глазунов, Л. А. Жуков и др.; под ред. В. А. Веникова, В. А. Строева. – М.: Высш. шк., 1998. – 511 с.
2. Электрические системы и сети / Буслова Н.В., Винославский В.Н., Денисенко Г.И., Перхач В.С.; под ред. Г.И. Денисенко. – Киев: Вища шк., 1986. – 584 с.
3. Идельчик В.И. Электрические системы и сети / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
4. Барбашов И. В. Основы анализа установившихся режимов электрических систем и сетей: учеб. пособ. / И.В. Барбашов, Ю. Н. Веприк, В. В. Черкашина, О. В. Шутенко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – 184 с.
5. Барбашов И.В. Общая характеристика и основы анализа установившихся режимов современных электрических систем и сетей: текст лекций / И.В. Барбашов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. – 240 с.
6. Барбашов И. В. Расчет установившихся режимов замкнутых электрических сетей в примерах и задачах: учеб. пособ. / И. В. Барбашов, Г. В. Омеляненко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. – 144 с.

7. Барбашов И.В. Параметры и схемы замещения элементов электрических систем в примерах и задачах: учеб. пособ. / И.В. Барбашов, Г.В. Омеляненко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2017. – 160 с.

8. Барбашов И.В. Расчет установившихся режимов разомкнутых электрических сетей в примерах и задачах: учеб. пособ. / И.В. Барбашов, Г.В. Омеляненко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. – 164 с.

References (transliterated)

1. Venikov V. A., Glazunov A. A., Zhukov L. A., etc. *Elektricheskiye sistemy. Elektricheskiye seti* [Electrical system. Electric networks]. Moscow, High school Publ, 1998. 511 p.
2. Buslova N. V., Vinoslavskiy V. N., Denisenko G. I., Perhach V. S. *Elektricheskiye sistemy i seti* [Electric systems and networks]. Kyiv, High school Publ, 1986. 584 p.
3. Idelchik V. I. *Elektricheskiye sistemy i seti* [Electric systems and networks]. Moscow, Energoatomizdat Publ, 1989. 592 p.
4. Barbashov I. V., Veprik Yu N., Cherkashina V. V., Shutenko O. V. *Osnovy analiza ustanovivshikhsya rezhimov elektricheskikh setey i setey* [Bases of the analysis of the established modes of electric systems and networks]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ, 2010. 184 p.
5. Barbashov I. V. *Obshchaya kharakteristika i osnovy analiza ustanovivshikhsya rezhimov sovremennykh elektricheskikh sistem i setey* [General characteristics and bases of the analysis of the established modes of modern electrical systems and networks]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ, 2013. 240 p.
6. Barbashov I. V., Omel'yanenko G. V. *Raschet ustanovivshikhsya rezhimov zamknytykh elektricheskikh setey v primerakh i zadachakh* [Calculation of the established modes of electric networks closed in examples and tasks]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ, 2018. 144 p.
7. Barbashov I. V., Omel'yanenko G. V. *Parametry i skhemy zameshcheniya elementov elektricheskikh sistem v primerakh i zadachakh* [Parameters and equivalent circuit elements of electrical systems in examples and problems]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ, 2017. 160 p.
8. Barbashov I. V., Omel'yanenko G. V. *Raschet ustanovivshikhsya rezhimov razomknytykh elektricheskikh setey v primerakh i zadachakh* [Calculation of steady-state modes of open electrical networks in examples and problems]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ, 2018. 164 p.

Поступила (received) 10.03.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Барбашов Ігор Володимирович (Барбашов Игорь Владимирович, Barbashov Igor Volodymyrovych) – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел. (050)1460438; e-mail: i.v.barbashov@gmail.com

Обухов Валерій Романович (Обухов Валерий Романович, Obukhov Valeriy Romanovich) студент 5 курсу кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел. (095)1399595; e-mail: prosto.valeriy.o@gmail.com

Риморєв Дмитро Сергійович (Рыморев Дмитрий Сергеевич, Rymoriev Dmytro Serhiyovych) – студент 5 курсу кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел. (050)5225851; e-mail: Rydis@ukr.net